

РЕКОНСТРУКЦИЯ МОДЕЛИРОВАННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В КООРДИНАТНЫХ ДЕТЕКТОРАХ ЭКСПЕРИМЕНТА SRC УСТАНОВКИ BM@N

В. Ленивенко¹, В. Пальчик, М. Пацюк

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Процедура реконструкции в координатных детекторах эксперимента SRC на установке BM@N была разработана для моделированных и экспериментальных данных, измеренных в 2018 г. Многопроволочные пропорциональные камеры и кремниевые детекторы располагались перед анализирующим магнитом эксперимента SRC на установке BM@N. Разработанные алгоритмы добавлены в официальное программное обеспечение. Результаты реконструкции сравнивались с данными моделирования. Оценены и проанализированы основные характеристики координатных детекторов перед анализирующим магнитом.

The procedure of reconstruction for coordinate detectors of the SRC setup at BM@N was developed for both simulated and experimental data measured in 2018. Multiwire proportional chambers and silicon detectors were located upstream of the analyzing magnet at the SRC at BM@N setup. The developed algorithms were added to the official software. The reconstruction results were compared with the simulation data. The main characteristics of the coordinate detectors upstream of the analyzing magnet were evaluated and analyzed.

PACS: 01.50.Pa; 07.77.Ka

ВВЕДЕНИЕ

BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) [1] — это первый эксперимент на фиксированной мишени ускорительного комплекса NICA, который создается в Дубне. SRC (Short-Range Correlations) [2–4] — это тема в физической программе BM@N, направленная на изучение свойств локальных флуктуаций ядерной плотности, вызванных близким расположением ядерных пар нуклонов в углеродном ядре. Рис. 1 показывает экспериментальную установку, используемую для первого измерения SRC на установке BM@N в 2018 г. Экспериментальная установка состоит из жидководородной мишени и приведенных на рис. 1 детекторов. Сцинтилляционные счетчики использовались для определения начального времени отсчета событий (T_0), измерение общего заряда на событие производилось с помощью BC1–4 вдоль пучка и являлись частью системы триггера. Детекторы для определения траекторий частиц перед

¹E-mail: vasilisa@jinr.ru

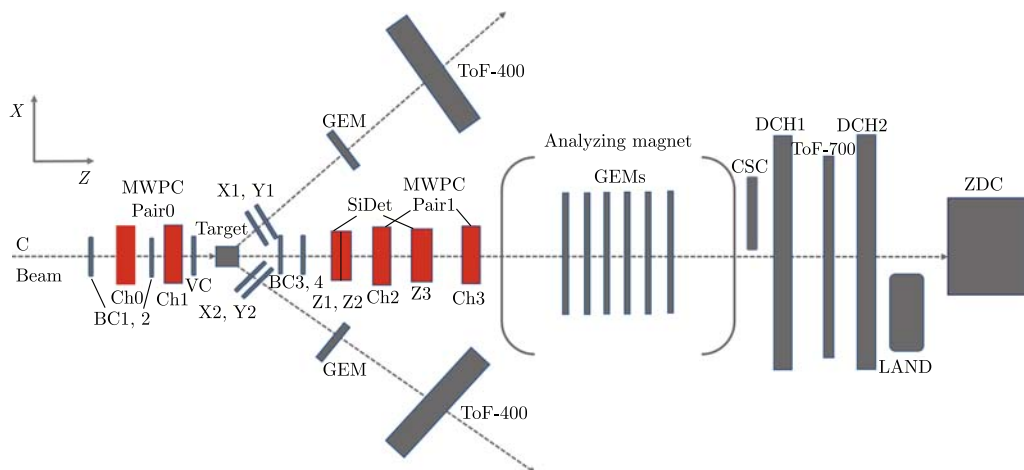


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для первого измерения короткодействующих корреляций (SRC) на установке BM@N в 2018 г.

анализирующим магнитом — многопроволочные пропорциональные камеры (MWPC) [5] и кремниевые детекторы (SiDet) [6], после магнита располагались две дрейфовые камеры (DCH). Двухплечевой спектрометр содержал триггерные сцинтилляционные счетчики (X1, X2, Y1, Y2), газовые умножители электронов (GEM), измеряющие координаты трека, и систему времени пролета (ToF), помогающую отделять сигнальные протоны от фоновых пионов.

Как показано на рис. 1, между мишенью и магнитом находилась система координатных детекторов, состоящая из двух MWPC (Pair1) и трех двухкоординатных детекторов SiDet (первые два детектора находятся в одном экран-боксе). Две MWPC, составляющие Pair0, были расположены перед мишенью. Пара Pair0 использовалась для определения вектора пучка, падающего на мишень. Координата первичной точки взаимодействия была рассчитана с использованием трека входного пучка от Pair0 и восстановленных треков протонов в двухплечевом спектрометре. MWPC и SiDet после мишени и DCH измеряли прямые траектории остаточных ядер перед и после анализирующего магнита, которые вместе с информацией о заряде из счетчиков BC (BC3, BC4) использовались для идентификации фрагментов. Результаты физического анализа приведены в [7]. Более подробную информацию о реконструкции SiDet и MWPC можно найти в [8].

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕКОНСТРУКЦИИ ДЕТЕКТОРОВ ПЕРЕД МАГНИТОМ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Камера MWPC состоит из шести проволочных плоскостей, находящихся на расстоянии 1 см друг от друга вдоль оси Z. Каждая плоскость состоит из 96 анодных проволочек с шагом 2,5 мм. Координатная плоскость SiDet состоит из модулей на основе двусторонних стриповых детекторов с прямыми стрипами, расположенными перпендикулярно оси X на одной стороне, и наклонными, под углом $2,5^\circ$ к ним стрипами на

другой стороне. Каждый модуль имеет 640 прямых и 640 наклонных стрипов с шагом 95 и 103 мкм соответственно. Для оценки внутренней эффективности проволочные плоскости в MWPC названы слоем, аналогично тому, как один слой стрипов в SiDet называется слоем. Кластер в MWPC представляет собой совокупность множества зажженных близкорасположенных проволок. Кластер в кремниевом детекторе — это группа стрипов, расположенных подряд с амплитудой сигналов выше порога 150 каналов ADC. Центр тяжести кластера по амплитуде обозначается как хит.

Эффективность на слое для детекторов SiDet и камер MWPC вычисляется как отношение количества хитов на слое, принадлежащих треку, к количеству реконструированных треков. Эффективность слоев для трех станций SiDet и четырех камер MWPC представлена на рис. 2. Средняя эффективность слоя для SiDet составляет 90%. Средняя эффективность слоя для камер MWPC перед мишенью составляет 94%, а для камер после мишени — 98%.

Эффективность восстановления треков MWPC перед мишенью рассчитывалась относительно идентифицированных углеродных ионов в сцинтилляционных счетчиках BC1 и BC2. То есть как отношение количества событий, содержащих хотя бы один трек, прошедший через Pair0, в случае если был зарегистрирован заряд в BC1 и BC2, к количеству событий с зарегистрированным зарядом в BC1 и BC2. Эффективность восстановления Pair0 в зависимости от номера экспериментальных данных представлена на рис. 3. Средняя эффективность реконструкции MWPC (Pair0) для ионов углерода составляет $(92,2 \pm 0,1)\%$.

Эффективность восстановления треков для MWPC после мишени (Pair1) была рассчитана как отношение числа событий, содержащих по крайней мере один трек в Pair1 и один трек в Pair0, к числу событий, в которых углеродный ион был идентифицирован в BC1, BC2, BC3 и BC4 и хотя бы один трек был восстановлен в Pair0. Эффективность восстановления треков для MWPC (Pair1) для экспериментальных данных, показанных на рис. 4, составляет $(90,4 \pm 0,3)\%$ для ионов углерода с $Z = 6$, $(92,3 \pm 0,4)\%$ для ионов бора с $Z = 5$ и $(92,6 \pm 0,5)\%$ для ионов бериллия с $Z = 4$.

Эффективность восстановления треков для SiDet была оценена относительно счетчиков BC. В частности, было вычислено число событий, содержащих хотя бы один

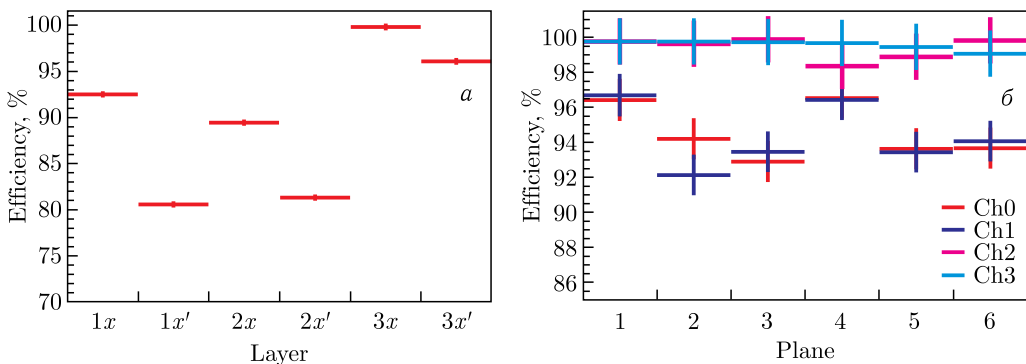


Рис. 2. Эффективность слоев трех станций SiDet (1, 2, 3 обозначают три станции SiDet, x и x' соответствуют прямым и наклонным стрипам) (а) и для MWPC (б). Данные для пустой мишени

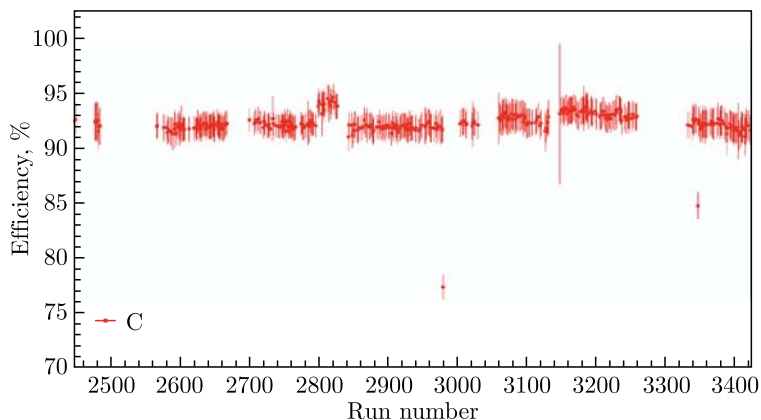


Рис. 3. Эффективность восстановления треков MWPC в Pair0 в зависимости от экспериментальных данных. Средняя эффективность для ионов углерода — $(92,2 \pm 0,1) \%$

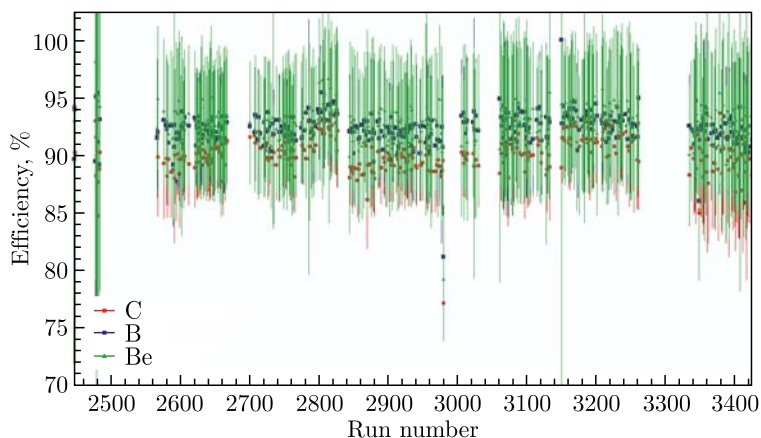


Рис. 4. Эффективность реконструкции треков MWPC (Pair1) в зависимости от экспериментальных данных для разных ионов: C — ион углерода, B — ион бора и Be — бериллий

трек SiDet и MWPC (Pair0), к событиям, в которых ион углерода был идентифицирован в BC1, BC2, и точно один трек был восстановлен в Pair0. Эффективность восстановления треков для SiDet на основе экспериментальных данных показана на рис. 5, и в среднем она составляет $(81,5 \pm 0,7) \%$ для ионов с $Z = 6$ и $(82,6 \pm 0,7) \%$ для ионов с $Z = 5$. Эффективность невысокая частично из-за того, что эффективность рассчитывается относительно первой пары камер MWPC, а также иногда несинхронной работы детекторов.

Объединенные треки (Upstream track) [8] после мишени, но до анализирующего магнита были восстановлены с использованием информации из MWPC (Pair1) и треков из детектора SiDet. Эффективность реконструкции объединенных треков была оценена относительно счетчиков BC и вычислена как дробь: знаменатель представляет собой сумму событий, в которых с помощью счетчиков BC1 и BC2 определялся

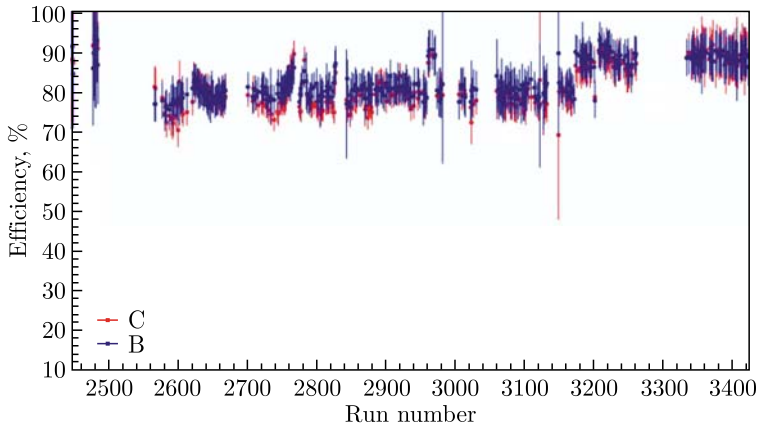


Рис. 5. Эффективность реконструкции треков в SiDet в зависимости от экспериментальных данных: для ионов углерода (C) и ионов бора (B)

заряд иона за событие вдоль пучка и был хотя бы один трек в Pair0. Числитель суммировался в случае, если в событии был зарегистрирован ион счетчиками BC3 и BC4 и был хотя бы один трек в Pair0, а также был найден любой трек между мишенью и магнитом: это мог быть трек в MWPC (Pair1) или в SiDet, или их комбинация. Значения эффективности восстановления Upstream-трека можно найти в [8].

ПРОЦЕДУРА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Генератор DCM-SMM [9] представляет ожидаемую топологию событий в экспериментах BM@N и SRC на BM@N. Кинетическая энергия углеродного пучка составляет 3,17 ГэВ/нуклон. Используется статистика порядка 50 млн событий. Треки, сгенерированные моделью, проходят через объемы детекторов экспериментальной установки с помощью BmnRoot [10] для изучения выхода реакции $^{12}\text{C}(p, 2p)X$.

Первый шаг в моделировании отклика детекторов — трассировка траекторий частиц от мишени через детекторы и материалы установки с учетом магнитного поля и всех физических эффектов с использованием BmnRoot на основе Geant4. Генератор ионов использовался для тестирования алгоритма в идеальных условиях.

Частицы, пройдя через камеры MWPC, генерируют полученные методом Монте-Карло точки (МС-точки) в каждом из шести слоев камеры, которые затем переводятся в номера ближайших проволок. Номера проволок, полученные таким образом, подаются на вход алгоритму реконструкции [8], который создает трек-сегмент, затем и треки таким же образом, как если бы это были экспериментальные данные.

Реалистичная эффективность частицы для создания сигнала в детекторе моделировалась с помощью генератора случайных чисел [11]. Разница между координатой МС-точки и проведенным треком на плоскости MWPC, а также разница координаты трека и измерения показана на рис. 6. Как можно видеть из рисунка, стандартные отклонения (σ) распределения для МС (рис. 6, б) и экспериментальных данных (рис. 6, а) согласуются и составляют 464 и 311 мкм соответственно. Разница между моделированием и реальными данными может быть объяснена, с одной стороны,

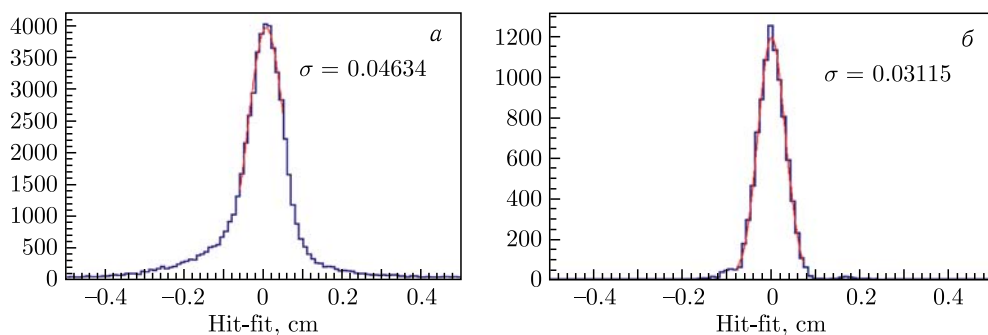


Рис. 6. а) Разница между измерением и координатой трека; б) разница между координатой МС-точки и координатой трека на плоскости MWPC (Ch2)

эффективностью детекторов (эффективности были определены на реальных данных), а с другой стороны, большой множественностью ложных шумов, в то время как МС-события чище и дают более точный результат для любого восстановленного объекта.

Аналогичным образом организована процедура моделирования в детекторе SiDet. Сгенерированный трек, проходящий через область детектора, оставляет МС-точки на каждом слое SiDet. Точка в детекторе SiDet размывается гауссовой функцией со значением σ 30 мкм для прямых и 35 мкм для наклонных стрипов. Точки МС преобразуются в номера сработавших прямых и наклонных стрипов, которые вводятся в программный пакет реконструкции, как если бы это были реальные данные. В системе SiDet прямой трек аппроксимируется с использованием метода наименьших квадратов. Точки МС используются точно так же, как экспериментальные данные [8].

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА РЕКОНСТРУКЦИИ НА МОДЕЛИРОВАННЫХ ДАННЫХ

Оценка эффективности алгоритмов реконструкции очень важна для анализа данных. Для этой цели была добавлена возможность работы с моделированными данными. Эффективность алгоритма может быть оценена простым отношением числа восстановленных алгоритмом треков к числу сгенерированных треков.

Эффективность алгоритма для различных систем детекторов и для двух генераторов показана в таблице. Более низкую эффективность алгоритм имеет для генератора DCM-SMM, что связано со сложной топологией сгенерированных физических событий.

Рис. 7 показывает количество сгенерированных и восстановленных треков на одно событие с использованием генератора DCM-SMM. Эффективность восстановления объединенных треков составляет 96 %. Это означает, что не все треки восстанавливаются в многотрековых событиях, что не так критично для восстановления реальных данных.

В физических событиях важно различать два близко проходящих трека. В результате фрагментации ^{12}C одна из 4 частиц: p , ^2He , ^3He , ^4He может пройти рядом

**Эффективность реконструкции моделированных данных с использованием генераторов:
ионного и DCM-SMM**

Генератор	Эффективность алгоритма, %				
	Ch2	Ch3	MWPC (Pair1)	SiDet	Детектор выше по потоку
Ион ^{12}C	99,9	99,9	99,2	99,9	99,0
DCM-SMM	97,4	98,3	96,4	97,0	96,0

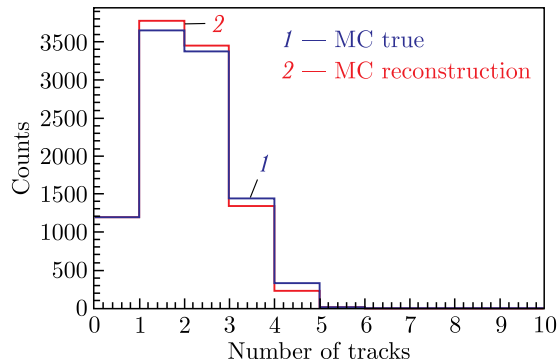


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Количество объединенных треков при использовании генератора DCM-SMM: восстановленные треки показаны красным цветом (2), MC-треки — синим (1)

с траекторией иона ^7Be в диапазоне менее 2° . Аналогичная картина наблюдается для ионов лития или гелия: $^7\text{Li}+^3\text{He}/^4\text{He}$, $^6\text{Li}+^3\text{He}/^4\text{He}$, $^4\text{He}+^4\text{He}$.

Скалярный угол между двумя близкими треками в системах детекторов перед магнитом был определен в моделировании. На рис. 8 показано угловое расстояние между двумя близкими треками для моделированных (синий, 1) и реконструированных (красный, 2) треков. Форма распределения схожа в обоих случаях.

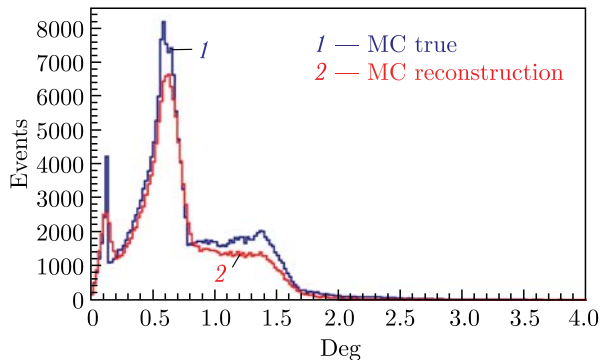


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Скалярный угол между двумя близкими треками, сгенерированными с использованием модели DCM-SMM: синий, 1 — моделированные треки, красный, 2 — реконструированные треки

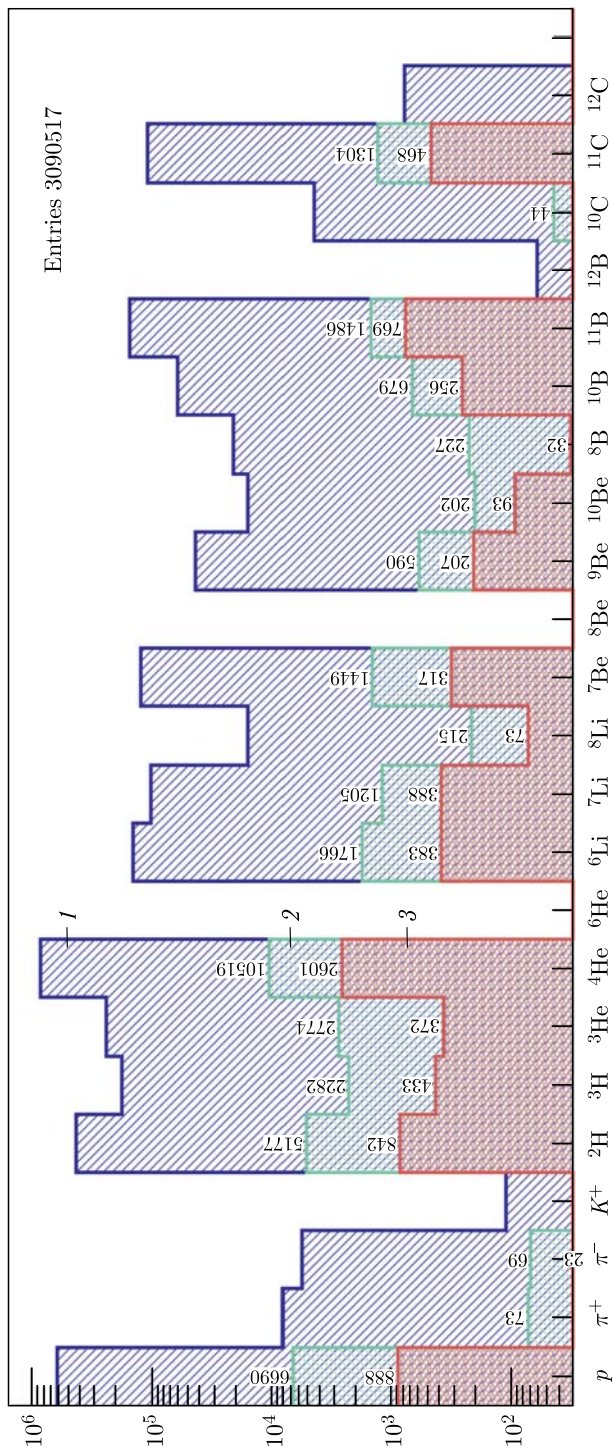


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Моделированный выход X-частиц в реакции $^{12}\text{C}(p, 2p)X$, проходящих через детекторы вдоль пучка при различных условиях для протонов и заряженных пионов в плечевых детекторах: заряженная частица была обнаружена хотя бы в одном из двух плеч плеч спектрометра (синий, 1), заряженные частицы были обнаружены в обоих плечах (зеленый, 2), протоны были обнаружены в обоих плечах (красный, 3)

ВЫХОД РЕАКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТОРА DCM-SMM

Анализ физики эксперимента SRC на установке BM@N основан на реакциях, где необходимо регистрировать протоны в двухплечевом спектрометре. На рис. 9 показаны распределения заряженных частиц, прошедших через системы детекторов SiDet и MWPC после мишени и зарегистрированных в дрейфовых камерах после магнита. Рассматривались три основных случая регистрации: заряженная частица была обнаружена хотя бы в одной из двух плеч спектрометра (синий, 1), заряженные частицы были обнаружены в обоих плечах (зеленый, 2), протоны были обнаружены в обоих плечах (красный, 3).

Особый интерес представляет собой соотношение выхода ядер ^{10}B и ^{11}B . Как видно из рис. 9, это соотношение на моделированных данных составляет около $256/769 = 33\%$, а экспериментальное значение равно $(27,5 \pm 3,0 \text{ (стат.)} \pm 5,3 \text{ (сист.)})\%$ [7], что согласуется между собой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Восстановление траекторий заряженных частиц с помощью моделированных и экспериментальных данных для систем MWPC (до и после мишени) и SiDet было полностью разработано и реализовано в программном обеспечении эксперимента BM@N. Эффективность восстановления треков перед анализирующим магнитом составляет 96% для моделированных и 97% для экспериментальных данных. Сравнение между восстановлением моделированных и экспериментальных данных показывает согласованные результаты. Разработанные алгоритмы могут быть использованы для дальнейшего анализа.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 18-02-40046.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kapishin M.* The Fixed Target Experiment for Studies of Baryonic Matter at the Nuclotron (BM@N) // *Eur. Phys. J. A.* 2016. V. 52. P. 213.
2. *Atti C. C.* In-Medium Short-Range Dynamics of Nucleons: Recent Theoretical and Experimental Advances // *Phys. Rep.* 2015. V. 590. P. 1.
3. *Hen O., Miller G. A., Piasetzky E., Weinstein L. B.* Nucleon–Nucleon Correlations, Short-Lived Excitations, and the Quarks Within // *Rev. Mod. Phys.* 2017. V. 89. 045002.
4. *Feldmeier H., Horiuchi W., Ne T., Suzuki Y.* Universality of Short-Range Nucleon–Nucleon Correlations // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 84. 054003.
5. *Sauli F.* Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers. CERN-77-09. 1977.
6. *Kovalev Yu., Kapishin M., Khabarov S., Shafronovskaia A., Tarasov O., Makankin A., Zamiatin N., Zubarev E.* Central Tracker for BM@N Experiment Based on Double Side Si-Microstrip Detectors // *J. Instrum.* 2017. V. 12. C07031.
7. *Patsyuk M. et al. (BM@N Collab.).* Unperturbed Inverse Kinematics Nucleon Knockout Measurements with a 48 GeV/c Carbon Beam // *Nature Phys.* 2021. V. 17. P. 693–699.

8. *Lenivenko V., Palichik V., Patsyuk M.* SRC at BM@N: Reconstruction of Tracks Upstream and Downstream from the Target Using the MWPC and Silicon Detector Systems // AIP Conf. Proc. 2021. V.2377. 030010.
9. *Baznat M., Botvina A., Musulmanbekov G., Toneev V., Zhezher V.* Monte-Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM. arxiv:1912.09277v2. 2019.
10. *Batyuk P., Gertsenberger K., Merts S., Rogachevsky O.* The BmnRoot Framework for Experimental Data Processing in the BM@N Experiment at NICA // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V.214.
11. *Knuth D.E.* The Art of Computer Programming. 2. Seminumerical Algorithms. Addison-Wesley Longman Publ. Co., Inc., 1997.

Получено 14 апреля 2023 г.